

**С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. А. ДАНИЛЬЧЕНКО, И. И. БОРЗЕНКОВ, И. Л. ЛЕБЕДИНСКИЙ**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ УТЕЧКИ В ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В статье рассматривается вопрос определения технических потерь электрической энергии в изоляционных конструкциях при передаче электрической энергии по высоковольтным воздушным линиям электропередачи. Уточнен расчет потерь электрической энергии за счет уточнения активной составляющей тока утечки при потерях энергии в диэлектрике, а также проводимости образовавшегося слоя загрязнения на поверхности изолятора в зависимости от степени загрязнения атмосферы и длительности воздействия погодных условий.

**Ключевые слова:** ток утечки, изоляция, изоляторы стеклянные, изоляторы фарфоровые, тангенс дельта.

**С. Ю. ШЕВЧЕНКО, Д. О. ДАНИЛЬЧЕНКО, І. І. БОРЗЕНКОВ, І. Л. ЛЕБЕДИНСЬКИЙ**

## ВИЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ ВИТОКУ В ІЗОЛЯЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

У статті розглядається питання визначення технічних втрат електричної енергії в ізоляційних конструкціях при передачі електричної енергії по високовольтним повітряним лініях електропередавання. Уточнено розрахунок втрат електричної енергії за рахунок уточнення активної складової струму витоку при втратах енергії в діелектрику, а також провідності утвореного шару забруднення на поверхні ізолятора в залежності від ступеня забруднення атмосфери і тривалості впливу погодних умов.

**Ключові слова:** струм витоку, ізоляція, ізолятори скляні, ізолятори фарфорові, тангенс дельта.

**S. U. SHEVCHENKO, D. A. DANYLCHENKO, I. I. BORZENKOV, I. L. LEBEDINSKY**

## DETERMINATION OF LEAKAGE CURRENTS IN THE INSULATION OF OVERHEAD ELECTRICAL TRANSMISSION LINES

The compilation of electric energy balances in power systems is one of the most important components of the technical and economic indicator of the power system as a whole, since a qualitative assessment of various types of losses provides an objective answer to the system's energy efficiency in energy saving. The article deals with one of the issues of determining technical energy losses in insulating structures when transmitting electrical energy through high-voltage overhead power lines, by specifying the active and reactive component of the total leakage current across the surface of the insulator during thermal dissipation of energy in the dielectric depending on the degree of contamination of the surface of the insulating structure disc insulator. One of the methods for determining the loss of the dispersed electrical energy in the dielectric of a plate insulator depending on the degree of contamination of its surface with definition of the active and reactive component of the total leakage current by an experimental method is proposed. The method consists in determining the dielectric loss tangent and capacitance plate insulators of stationary conditions for the three states of its surface (clean dry, clean wetted with water, contaminated with a layer of dust). Two types of plate insulators PF – 70 A suspended porcelain, PSD – 70 E suspended glass were chosen as objects of research. According to the obtained experimental data, calculations were made of the active and reactive components of the total leakage current on the surface of the insulator, as well as the energy dissipated in the dielectric. A brief analysis of the results.

**Keywords:** leakage current, insulation, glass insulators, porcelain insulators, tan delta.

**Введение.** Как известно для всех объектов энергосистем составляются балансы электроэнергии. Баланс электроэнергии – количественная характеристика, которая учитывает, что количество электроэнергии, которое поступило на объект всегда должно равняться сумме электроэнергии, которая вышла с объекта и которая была израсходована внутри него. Однако, также существует небаланс системы – как следствие погрешности фиксации приборами составляющих баланса, а также наличием потерь, которые совсем не фиксируются приборами, например, это: технические потери, значение которых определяется расчетным путем, и коммерческие потери, которые объясняются как характеристиками объекта, так и воздействием на них внешних сил.

Величина технических потерь энергии при передаче электрической энергии в изоляционных конструкциях воздушных линий электропередач согласно [1], с учетом степени загрязнения атмосферы (СЗА) определяется по следующей формуле:

$$\Delta W_{\text{isol}}^{(P)} = \frac{U_{\text{nom}}^2}{3 \cdot R_{\text{isol}} \cdot N_{\text{insul}}} \cdot T_{\text{hum}} \cdot N_{\text{gir}}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{nom}}$  – номинальное напряжение ВЛ, кВ;  $N_{\text{isol}}$  – количество изоляторов в фазе ВЛ;  $N_{\text{gir}}$  – количество гирлянд изоляторов, которую принимают при проектировании ВЛ;  $T_{\text{hum}}$  – продолжительность в расчетном периоде влажной погоды (туман, роса, дождь, мокрый снег, изморозь), ч;  $R_{\text{isol}}$  – электрическое сопротивление одного изолятора, кОм, которое определяется согласно [2] по формуле:

$$R_{\text{isol}} = 1345 - 215 \cdot (N_p - 1), \quad (2)$$

где  $N_p$  – номер уровня степени загрязнения атмосферы, которое определяется согласно [3].

**Цель работы.** Как видно из формулы (1) в ней не учитываются такие параметры, как: сопротивление току утечки или величина проводимости слоя загрязнения на поверхности юбки изолятора в зависимости от значения его толщины [4], и времени воздействия погодных условий. Не учет указанных

параметров вносит существенную погрешность в определение величины тока утечки, а приведенное сопротивление  $R_{\text{isol}}$  формула (2), значение которого изменяется линейно в зависимости от СЗА, не дает полной информации для определения технических потерь энергии (1) в изоляционных конструкциях ВЛ при передаче электрической энергии. В работе предпринята попытка учесть выше перечисленные параметры косвенными методами.

Влияние погодных условий уменьшают электрическую прочность изоляторов [4] и в некоторых случаях при интенсивном загрязнении поверхности изоляторов приводит к их перекрытию. Увлажнение поверхности изоляционной конструкции приводит к увеличению удельной проводимости слоя загрязнения по поверхности изолятора и как следствие увеличению токов утечки, что в свою очередь приводит к увеличению потерь энергии.

Определение величины тока утечки и проводимости слоя загрязнения изоляционной конструкции может быть выполнено при помощи измерения таких параметров изоляции как: тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в конструкции изолятора и ёмкости изолятора  $C_{\text{insul}}$  в зависимости от СЗА и рода воздействия погодных условий (туман, роса, дождь, мокрый снег, изморозь). В проведенных исследованиях в лабораторных условиях были изучены три состояния поверхности тарелки изолятора: сухая чистая; сухая с слоем пыли; чистая смоченная водой. Такой подход к проведению экспериментальных исследований позволяет смоделировать сразу несколько вариантов поверхностной проводимости изоляционной детали изоляторов, что соответствует разным степеням загрязнения окружающей среды.

#### Определение емкости изолятора и тангенса угла диэлектрических потерь.

Активная составляющая тока утечки по поверхности изолятора в разных источниках [4 - 10] определяется выражением:

$$I_u = \frac{U}{R_u}, \quad (3)$$

где  $R_u$  – сопротивление току утечки по поверхности изолятора если слой загрязнения имеет толщину  $\Delta$  с удельным объемным сопротивлением  $\rho$ .

Сопротивление току утечки можно определить по следующей формуле:

$$R_u = \frac{\rho \cdot L_u}{\pi \cdot \Delta \cdot D}, \quad (4)$$

где  $L_u$  – длина пути утечки.

Следовательно, из формул (3) и (4) ток утечки будет определяться как:

$$I_u = \frac{U \cdot \pi \cdot \Delta \cdot D}{\rho \cdot L_u}, \quad (5)$$

Исходя из выражения (5), не имея значений таких параметров как толщина слоя загрязнения  $\Delta$  и его удельного объемного сопротивления  $\rho$ , невозможно рассчитать величину тока утечки. Кроме того, формула (5) приведена для расчета цилиндрического гладкого изолятора, что делает ее применение на практике для

расчетов реальных конструкций практически невозможным.

Если рассмотреть классическую электрическую схему замещения [5] гирлянды изоляторов (рис. 1), то выяснится, что определить из нее значения емкости изолятора не представляется возможным. В разных источниках приводят средневзвешенные значения емкостей: емкость по отношению к опоре ВЛ  $C_1 = 4 - 5$  пФ; емкость по отношению к проводу ВЛ  $C_2 = 0,5 - 0,1$  пФ; и емкость изолятора  $C = 50 - 70$  пФ которые влияют на распределение напряжения по гирлянде изоляторов. Из приведенных значений очень сложно определить полную емкость каждого отдельного изолятора в гирлянде. Как правило в расчетах полей используют проходную емкость изолятора в качестве его полной емкости.

Следует обратить внимание на то, что величина емкости  $C$  будет изменяться в зависимости от отсутствия или наличия слоя загрязнения. Это связано с тем, что диэлектрическая проницаемость слоя загрязнения будет зависеть от его состояния и состава. Поэтому определение емкости загрязненного изолятора позволит учесть наличие на его поверхности определенного вида загрязнения.

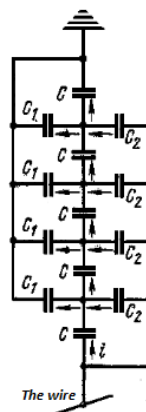


Рис. 1 Схема замещения гирлянды изоляторов.

Все выше изложенное определяет необходимость уточнения токов утечки. В работе нами предлагается определить токи утечки проводя измерения двух параметров изолятора таких как: емкость  $C_x$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  экспериментальным путем. На основании полученных результатов экспериментов появляется возможность определения активной составляющей тока утечки расчетным путем.

Для экспериментального определения емкости  $C_x$  изолятора и тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  в работе было проведено 3 серии экспериментов, по 100 опытов в каждой серии, с использованием измерительного прибора «Вектор 2М», который работает на основании принципа моста Шеринга (рис. 2) и предназначен, для измерения параметров изоляции, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в высоковольтной изоляции при различных значениях испытательных напряжений.

Процесс измерения заключается в уравнивании (балансировке) мостовой схемы

поочередной регулировкой сопротивления резистора и емкости магазинов конденсаторов.

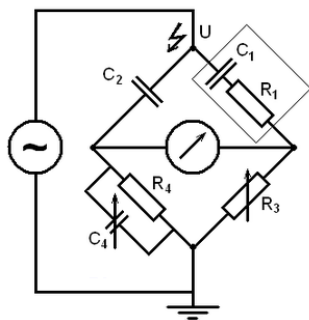


Рис. 2 Схема моста Шеринга

где  $C_1$  – исследуемый конденсатор,  $R_1$  – последовательное сопротивление в эквивалентной схеме исследуемого конденсатора,  $C_2$  – эталонный конденсатор,  $R_3$  – безиндукционный резистор,  $C_4$  – переменный конденсатор,  $R_4$  – переменный безиндукционный резистор, включенный параллельно с  $C_4$ .

В качестве объектов исследования были выбраны два типа изоляторов:

- «ПФ-70А» Рис. 3, подвесной фарфоровый изолятор с длиной пути утечки  $l_{yt} = 303$  мм и минимальной разрушающей нагрузкой 70 кН;

- «ПСД-70Е» Рис. 4, подвесной стеклянный двукрылый изолятор (для районов с загрязненной атмосферой) усиленной изоляционной характеристикой и длиной пути утечки  $l_{yt} = 411$  мм с минимальной разрушающей нагрузкой 70 кН.

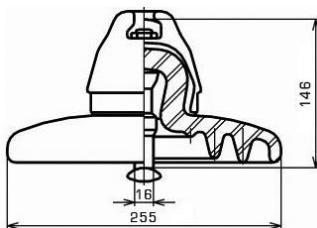


Рис. 3 Изолятор типа ПФ-70А

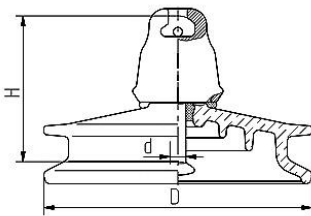


Рис. 4 Изолятор типа ПСД-70Е

Измерения исследуемых параметров проводились для трех состояний поверхности тарелки изоляторов (чистой сухой, загрязненной слоем пыли, чистой смоченной водой) с использованием «Нормальной» схемы измерения которая представлена на рис. 5.

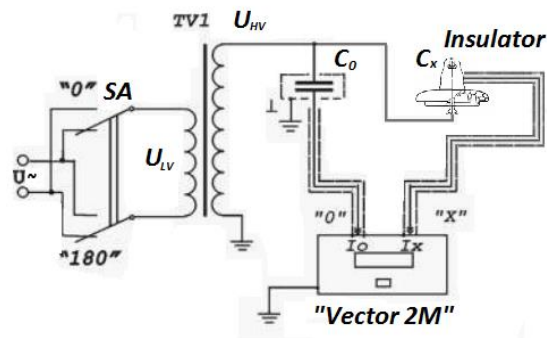


Рис. 5 «Прямая» схема измерения

При измерениях применяют две схемы включения моста: так называемую «Нормальную», или «Прямую», в которой измерительный элемент включен между одним из электродов испытуемой изоляционной конструкции и землей, и «Перевернутую», где он включен между электродом испытуемого объекта и выводом высокого напряжения моста. «Нормальную» схему применяют, когда оба электрода изолированы от земли, «Перевернутую» – когда один из электродов наглухо соединен с землей.

Испытательное напряжение  $U_{HV}$  подаваемое на объект «Пестик» изолятора по «Прямой» схеме измерения составляло 10 кВ. Полученные средние значения результатов измерений емкости изолятора  $C_x$  и тангенса диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Средние значения емкости изолятора  $C_x$  и  $\text{tg}\delta$

Тип	Состояние поверхности изолятора					
	Сухой чистый		Сухой грязный		Чистый смоченный водой	
	$C_x$ , pF	$\text{tg}\delta$ , %	$C_x$ , pF	$\text{tg}\delta$ , %	$C_x$ , pF	$\text{tg}\delta$ , %
ПФ-70А	87.82	9.12	82.86	21	120.3	20.9
ПСД-70Е	67.76	2.039	65.72	2.067	77.31	3.49

Как видно с таблицы 1 при разных состояниях загрязнения поверхности тарелки изоляторов значения емкости  $C_x$  имеют разные величины и даже превышают значения приведенные в [5]. Следовательно, если учесть изменяющийся параметр  $\text{tg}\delta$  активная составляющая тока утечки  $I_a$  по поверхности изолятора тоже будет иметь разные значения.

#### Расчет активной составляющей тока утечки по поверхности изолятора

При переменном напряжении в изоляции протекает ток, опережающий по фазе приложенное напряжение на угол  $\phi$  (рис. 6), меньший 90 град. эл. на небольшой угол  $\delta$ , обусловленный наличием активного сопротивления.

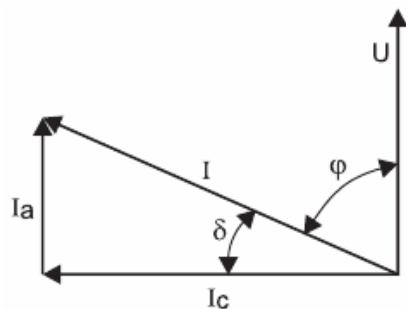


Рис. 6. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями:  $U$  — напряжение на диэлектрике;  $I$  — полный ток через диэлектрик;  $I_a$ ,  $I_c$  — соответственно активная и емкостная составляющие полного тока;  $\varphi$  — угол фазного сдвига между приложенным напряжением и полным током;  $\delta$  — угол между полным током и его емкостной составляющей

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика. При постоянном напряжении потери энергии определяются только силой сквозного тока, обусловленного объемной и поверхностной проводимостями. При переменном напряжении к этим потерям добавляются потери, обусловленные различного вида поляризациями, а также наличием полупроводниковых примесей, окислов железа, углерода, газовых включений и т. п.

Рассматривая простейший диэлектрик, можно записать выражение рассеиваемой в нем под воздействием переменного напряжения мощности:

$$P_a = U \cdot I_a, \quad (6)$$

где  $U$  — приложенное к диэлектрику напряжение,  $I_a$  — активная составляющая тока, протекающего через диэлектрик.

Схему замещения диэлектрика обычно представляют в виде последовательно соединенных конденсатора и активного сопротивления. Из векторной диаграммы (см. рис. 6):

$$I_a = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (7)$$

где  $\delta$  — угол между вектором полного тока  $I$  и его емкостной составляющей  $I_c$ .

Следовательно после подстановки (7) в (6) потери энергии в диэлектрике будут равны:

$$P_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (8)$$

Емкостную составляющую  $I_c$  полного тока можно определить из следующего выражения:

$$I_c = U \cdot \omega \cdot C_x, \quad (9)$$

где  $C_x$  — емкость конденсатора (данного диэлектрика) при угловой частоте  $\omega$ .

В результате рассеиваемая в диэлектрике мощность будет равна:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (10)$$

Из (10) видно, что потери энергии, рассеиваемые в диэлектрике, пропорциональны тангенсу угла  $\delta$ ,

частоте приложенного напряжения и емкости конденсатора.

Подставив полученные экспериментальные значения таблицы 1 в выражения (7) (9) (10) получим искомые значения активной  $I_a$  и реактивной  $I_c$  составляющей полного тока, а также рассеиваемую мощность в диэлектрике  $P_a$ , которые сведены в таблице 2 для изолятора типа ПФ-70А и в таблице 3 для изолятора типа ПСД-70Е.

Таблица 2 - Расчетные значения искомых величин изолятора типа ПФ-70А

Состояние поверхности изолятора	Параметры					
	U, кВ	f, Гц	X <sub>c</sub> , Ом	I <sub>c</sub> , А	I <sub>a</sub> , А	P <sub>a</sub> , Вт
Сухой чистый	10	50	3.63·10 <sup>7</sup>	0.3·10 <sup>-3</sup>	2.5·10 <sup>-5</sup>	0.25
Грязный сухой	10	50	3.85·10 <sup>7</sup>	0.3·10 <sup>-3</sup>	5.8·10 <sup>-5</sup>	0.58
Чистый смоченный водой	10	50	3.85·10 <sup>7</sup>	0.4·10 <sup>-3</sup>	7.9·10 <sup>-5</sup>	0.79

Таблица 3 - Расчетные значения искомых величин изолятора типа ПСД-70Е

Состояние поверхности изолятора	Параметры					
	U, кВ	f, Гц	X <sub>c</sub> , Ом	I <sub>c</sub> , А	I <sub>a</sub> , А	P <sub>a</sub> , Вт
Сухой чистый	10	50	4.7·10 <sup>7</sup>	0.2·10 <sup>-3</sup>	4.3·10 <sup>-6</sup>	0.043
Грязный сухой	10	50	4.8·10 <sup>7</sup>	0.2·10 <sup>-3</sup>	4.3·10 <sup>-6</sup>	0.043
Чистый смоченный водой	10	50	4.1·10 <sup>7</sup>	0.2·10 <sup>-3</sup>	8.5·10 <sup>-6</sup>	0.085

Как можно заметить с таблиц 1, 2 и 3 при разных состояниях поверхности тарелки изоляторов изменяется емкость  $C_x$  изолятора при этом изменяется угол диэлектрических потерь и как следствие появление активной составляющей тока  $I_a$  этих потерь. Сравнивая значения в таблице 1 можно заметить, что стеклянный изолятор менее изменяет свою емкостную характеристику чем фарфоровый изолятор при тех же экспериментальных условиях, это можно объяснить тем, что фарфор имеет пористую структуру и наличие микротрещин в глазури на поверхности тарелки изолятора приводит к увеличению емкости при интенсивных увлажнении его поверхности за счет впитывания влаги в тело диэлектрика изолятора.

**Вывод.** В ходе проведения работы видим, что при эксплуатации гирлянд изоляторов, изготовленных из фарфора и стекла при различных уровнях зон загрязнения атмосферы и погодных условий, токи утечки по поверхности изоляторов, могут изменять свои значения. Так же видно, что емкость и тангенс угла диэлектрических потерь изолятора так же изменяют свои значения в зависимости от вида загрязнения тарелки изолятора.

Так же необходимо заметить, что прикладываемое напряжение к одному изолятору при проведении исследования в лабораторных условиях было величиной 10 кВ, однако в реальных условиях эксплуатации распределение напряжения по гирлянде изоляторов (рис. 1) в зависимости от класса

напряжения воздушной линии электропередач имеют иные значения напряжения.

Как видим данный вопрос по уточнению токов утечки по изоляционным конструкциям линий электропередач нуждаются в дополнительных исследованиях. Так как не известно поведение значений токов утечки в реальных эксплуатационных условиях при длительных погодных воздействиях на загрязненные участки поверхности тарелки изоляторов.

### Список литературы

- 1 СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-82: 2013 Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання.
- 2 Железко Ю. С. Расчет анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. // М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. - 280 с
- 3 СОУ-Н МЕН 40.1-00013741-92:2014 Ізоляція електроустановок напругою від 6 кВ до 750 кВ. Інструкція з вибору та експлуатації.
- 4 Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общ. ред. В.П. Ларионова.-3-е изд., перераб. и доп.-М.: Энергоатомиздат, 1986-464 с.
- 5 Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических вузов. Под общей ред. Д.В. Разевиго. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1976.
- 6 Техника высоких напряжений: курс лекций / В. Ф. Вазов, В. А. Лавринович. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 150 с.
- 7 M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- 8 Fontana E. et al. Novel sensor system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines //IEEE transactions on power delivery. – 2006. – Т. 21. – №. 4. – С. 2064-2070.
- 9 Bychkov P. N. Insulation contamination of overhead transmission lines by extreme service conditions / Bychkov P. N., Zabrodina I. K., Shlapak V. S. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – Т. 23. – №. 1. – С. 288-293.
- 10 Shevchenko S. Influence of Direct Lightning Strikes and Lightning Strikes Near Power Lines with Protected and Non-Insulated Wires. / Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Minakova K. // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) - 17 - 21 pp.

### References

- 1 SOU-N EE 40.1-37471933-82: 2013 Metodichni rekomendatsiyi vyznachennya tekhnologichnykh vytrat elektrychnoyi enerhiyi v transformatorakh i liniyakh elektropredavannya.
- 2 Zhelezko Yu. S. Raschet analiz i normirovaniye poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov / Zhelezko Yu. S., Artemyev A. V., Savchenko O. V. // M.: Publishing house NTS ENAS, 2004. - 280 s
- 3 SOU-N MEN 40.1-00013741-92:2014 Izolyatsiya elektroustanovok napruhoju vid 6 kV do 750 kV. Instruksiya z vyboru ta ekspluatatsiyi.
- 4 Tekhnika vysokikh napryazheniy: Izolyatsiya i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh: Uchebnik dlya vuzov / V.V. Bazutkin, V.P. Larionov, Yu. S. Pinal; Under total ed. V.P. Larionov.-3rd ed., Pererab. and additional-M.: Energoatomizdat, 1986-464 s.
- 5 Tekhnika vysokikh napryazheniy. Uchebnik dlya studentov elektrotekhnicheskikh i elektroenergeticheskikh vuzov. Under the general ed. D.V. Razevigi. Ed. 2nd, Pererab. and add. M., "Energy", 1976.
- 6 Tekhnika vysokikh napryazheniy: kurs lektsiy / V. F. Vazhov, V. A. Lavrinovich. - Tomsk: TPU publishing house, 2008. - 150 p.
- 7 M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- 8 Fontana E. et al. Novel sensor system for leakage current detection on insulator strings of overhead transmission lines //IEEE transactions on power delivery. – 2006. – Т. 21. – №. 4. – С. 2064-2070.
- 9 Bychkov P. N. Insulation contamination of overhead transmission lines by extreme service conditions / Bychkov P. N., Zabrodina I. K., Shlapak V. S. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2016. – Т. 23. – №. 1. – С. 288-293.
- 10 Shevchenko S. Influence of Direct Lightning Strikes and Lightning Strikes Near Power Lines with Protected and Non-Insulated Wires. / Shevchenko S., Danylchenko D., Dryvetskyi S., Minakova K. // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) - 17 - 21 pp.

Надійшла (received) 03.07.2019

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Шевченко Сергей Юриевич (Шевченко Сергій Юрійович, Shevchenko Sergey)** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры передачи электрической энергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9658-7787>, E-mail: syurik42@gmail.com

**Данильченко Дмитрий Алексеевич (Данильченко Дмитро Олексійович, Danylchenko Dmytro)** - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры передачи электрической энергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7912-1849>, E-mail: Danylchenko.e@khp.edu.ua

**Борзенков Игорь Игоревич (Борзенков Ігор Ігорович, Borzenkov Igor)** – аспирант кафедры передачи электрической энергии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина, E-mail: i.borzenkov@etech.sumdu.edu.ua

**Лебединский Игорь Леонидович (Лебединський Ігор Леонідович, Lebedinsky Igor)** - кандидат технических наук, Заведующий кафедры электроэнергетики, Сумской государственной университет, Сумы, Украина, E-mail: i.lebedinskiy@etech.sumdu.edu.ua